УДК 551.55; 520.88
DOI: 10.18799/29495407/2025/2/91
Шифр специальности ВАК: 01.04.05

Измерение интенсивности турбулентности на трассе беспроводной передачи энергии лазерным излучением

Н.А. Макенова[1,2]✉, **Ю.Г. Грекова**[2], **Ф.Ю. Канев**[1]

[1] Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Россия, г. Томск
[2] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉makenova@iao.ru

Аннотация. ***Цель*** настоящей работы – изучение влияния атмосферных искажений на качество лазерного пучка, предназначенного для беспроводной передачи энергии и информации. ***Актуальность*** исследования обусловлена широким применением когерентного излучения в современных оптических системах и, как следствие, необходимостью компенсации турбулентных искажений. Для достижения поставленной цели использовались методы численного эксперимента, в частности, была построена модель прибора, предназначенного для измерения интенсивности атмосферной турбулентности и проведено исследование его работы в различных условиях. С использованием модели выполнено сравнение точности дифференциальной и одноканальной методик определения структурной постоянной и радиуса Фрида – параметров, характеризующих турбулентность. Кроме этого, в численном эксперименте регистрировались атрибуты пучка, которые достаточно сложно получить в натурных исследованиях. В результате выполненного анализа было показано, что структурная постоянная, так же, как и интегральные параметры излучения, не является исчерпывающей характеристикой процесса распространения излучения в атмосфере. Для более полного представления об искажениях необходимо получение дополнительных данных. Так, о неоднородностях волнового фронта могут нести информацию оптические вихри – особые точки, возникающие при распространении пучка в случайно-неоднородной среде. Было определено влияние условий распространения на количество вихрей, и получена их статистика.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии, лазерное излучение, измерение интенсивности турбулентности, радиус Фрида, оптические вихри, атмосферная турбулентность

Благодарности: Развитие используемой в расчетах математической модели было выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института оптики атмосферы.

Для цитирования: Макенова Н.А., Грекова Ю.Г., Канев Ф.Ю. Измерение интенсивности турбулентности на трассе беспроводной передачи энергии лазерным излучением // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2025. – Т. 3. – № 2. – С. 36–45. DOI: 10.18799/29495407/2025/2/91

UDC 551.55; 520.88
DOI: 10.18799/29495407/2025/2/91

Registration of turbulence intensity in the wireless energy transmission line with laser radiation

N.A. Makenova[1,2]✉, **Yu.G. Grekova**[2], **F.Yu. Kanev**[1]

[1] Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russian Federation
[2] National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉makenova@iao.ru

Abstract. ***Aim.*** To study the impact of turbulent distortions on the quality of laser radiation intended for wireless energy transmission in the atmosphere. ***Relevance.*** The widespread use of laser radiation in energy and in-

formation transmission lines and the need to compensate for radiation distortions on atmospheric paths. To achieve this goal the methods of numerical experiment were employed, in particular, a model of a device used to measure the intensity of atmospheric turbulence on the radiation propagation path was constructed, and a study of its operation under various conditions was conducted. Using the model, the authors have compared the accuracy of differential and single-channel methods for determining the structural constant and Fried's coherence length. In addition to atmospheric parameters, in numerical calculations the authors recorded the beam attributes that are quite difficult to obtain in field experiments. As a result of the analysis, it was shown that the structural constant, as well as the integral parameters of radiation, are not exhaustive characteristics of radiation propagation in the atmosphere. For a more complete understanding of distortions, it is necessary to obtain additional data, since optical vortices – special points that arise during beam propagation in a randomly inhomogeneous medium – can carry information about the inhomogeneities of the wave front. The article determined the influence of propagation conditions on the number of vortices and obtained their statistics in a turbulent environment.

Keywords: wireless power transmission, laser radiation, turbulence intensity registration, Fried's coherence length, optical vortices, atmospheric turbulence

Acknowledgements: Development of a mathematic model was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the State program for the Institute of Atmospheric Optics.

For citation: Makenova N.A., Grekova Yu.G., Kanev F.Yu. Registration of turbulence intensity in the wireless energy transmission line with laser radiation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2025, vol. 3, no. 2, pp. 36–45. DOI: 10.18799/29495407/2025/2/91

Введение

В настоящее время лазерное излучение широко применяется в системах передачи энергии и линях оптической связи, работающих на атмосферных трассах [1, 2]. В связи с этим интерес представляет изучение особенностей распространения лазерного пучка при наличии искажений, которые всегда появляются в его волновом фронте. Вариации показателя преломления, развивающиеся в турбулентной среде, вызывают случайные смещения центра тяжести пучка, увеличение его радиуса, хаотичные изменения распределения амплитуды. Отмеченные особенности приводят к снижению эффективности передачи энергии излучением и ошибкам при передаче данных. Компенсация искажений выполняется в системах адаптивной оптики – сложных установках, работа которых определяется условиями распространения пучков, поэтому для организации адаптивного управления необходима точная информация об атмосфере на трассе распространения. Для получения этой информации возможно использование различных методик, в частности регистрации смещений центра тяжести сфокусированного пучка в одной или двух апертурах и вычисления дисперсии смещений. Соответствующий прибор называется [3–5] дифференциальный измеритель турбулентности (ДИТ). В настоящей работе точность измерений, проводимых с его использованием, оценивается в серии численных экспериментов. Анализ был проведен для одноканальной и двухканальной схем регистрации [6, 7]. В результате решения задачи показано, что полученная с использованием прибора информация является недостаточной для исчерпывающего определения условий распространения, полная их характеристика возможна только с привлечением дополнительных данных.

Математическое описание распространения излучения в турбулентной среде и модель дифференциального измерителя интенсивности турбулентности

В численных экспериментах с измерителем интенсивности турбулентности использовались две модели – модель распространения излучения в турбулентной среде и модель самого прибора. Распространение гауссова пучка с комплексной амплитудой $E(x,y,z,t)$ от источника до апертуры ДИТ описывалось волновым уравнением, представленным в приближении квазиоптики [8]:

$$2ik\left(\frac{\partial E}{\partial z}+\frac{1}{v_{gr}}\frac{\partial E}{\partial t}\right)=\Delta_{\perp}E+\frac{2k^2}{n_0}\tilde{n}E, \qquad (1)$$

где x, y – координаты в плоскости, перпендикулярной направлению распространения; z – координата в направлении распространения; v_{gr} – групповая скорость; $\tilde{n}$ – случайное поле флуктуаций показателя преломления, обусловленных турбулентностью; n_0 – невозмущенное значение показателя; $\Delta_{\perp}=\partial^2/\partial x^2+\partial^2/\partial y^2$ – оператор Лапласа по поперечным координатам.

Для математического описания флуктуаций показателя преломления $n(r)$ обычно используется структурная функция, которая записывается следующим образом:

$$D_n(r_1,r_2)=\left\langle\left(n(r_1)-n(r_2)\right)^2\right\rangle, \quad (2)$$

где r – радиус-вектор точки регистрации n, а угловые скобки означают статистическое усреднение. В пределах инерционного интервала (в диапазоне пространственных размеров от внутреннего l_0 до внешнего L_0 масштаба турбулентности, т. е. в интервале от самых малых неоднородностей до самых больших) структурная функция подчиняется закону Колмогорова–Обухова (3) [9]:

$$D_n(r)=C_n^2 r^{2/3}. \quad (3)$$

Входящий в данную формулу коэффициент C_n называется структурной характеристикой показателя преломления атмосферы (структурной постоянной). Спектр мощности флуктуаций показателя преломления $\Phi_n(\kappa)$ задается формулой фон Кармана (4) [9]:

$$\Phi_n(\kappa)=0{,}033C_n^2(\kappa_L^2+\kappa^2)^{-11/6}\exp(-\kappa^2/\kappa_m^2),$$

$$\kappa_m=2\pi/l_0,\ \ \kappa_L=2\pi/L_0. \quad (4)$$

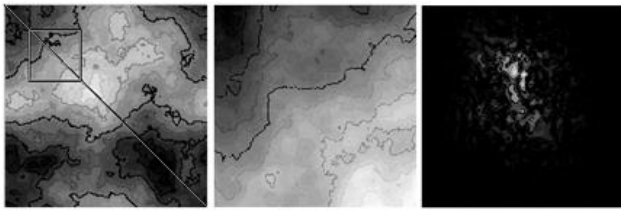
Через структурную постоянную вводится параметр, характеризующий корреляцию световой волны, называемый «радиус когерентности Фрида», который определяет условия распространения и для пучка и может быть рассчитан по формуле [10]:

$$r_0=1{,}69\left(0{,}423k^2C_n^2L\right)^{-3/5}. \quad (5)$$

Данное уравнение показывает, что зависимость r_0 от характеристик атмосферной трассы и параметров излучения выражается через структурную постоянную C_n, волновое число $k_0=2\pi/\lambda$ и длину трассы Z.

Методы моделирования распространения излучения в случайно-неоднородной среде и решения волнового уравнения в соответствующих условиях достаточно хорошо известны и широко применяются [11–15]. В данной работе решение волнового уравнения (1) выполнялось методом расщепления по физическим факторам [16] с использованием быстрого преобразования Фурье [17]. Так как расчет был выполнен для относительно коротких трасс, в модель был введен только один фазовый экран, расположенный в плоскости апертуры источника излучения. При решении длина трассы нормировалась на дифракционную длину $Z_d=k_0R^2$, а поперечные координаты x и y – на начальный радиус пучка a_0.

Особенностью рассматриваемой модели являлось то, что в ней учитывалось смещение турбулентных неоднородностей под влиянием потока среды (ветра). Для этого флуктуации показателя преломления задавались на расчетной сетке с размерностью 2048×2048 узлов. Из этой сетки вырезался экран 512×512 узлов, для которого и решалась задача распространения. Перенос неоднородностей осуществлялся за счет смещения второго экрана по «большой» сетке. Выполнение данных операций иллюстрируются на рис. 1, где приводится полное распределение возмущений (рис. 1, *а*) и вырезаемая из него часть, которая смещается в заданном направлении (1, *б*). На рис. 1 направление смещения показано прямой линией. Также на рисунке приводится полученное при решении задачи распределение амплитуды пучка (рис. 1, *в*). Скорость и направление потока задавались при формировании блока входных параметров модели.



а/a *б/b* *в/c*

Рис. 1. *Фазовый экран, заданный на сетке 2048×2048 узлов (а), вырезанная из него часть размерности 512×512 (б) и рассчитанное распределение амплитуды пучка (в)*

Fig. 1. *Phase screen defined on a grid of 2048×2048 nodes (*а*), a part of 512×512 nodes cut out from it (*b*), and the distribution of distorted beam amplitude (*c*)*

При моделировании ДИТ двухканальная оптическая схема прибора (рис. 2) строилась на основе статей [6, 7]. В модели после прохода слоя турбулентной атмосферы лазерный пучок попадал на непрозрачный экран (на входную апертуру прибора) с двумя субапертурами. Субапертуры вырезали участки волнового фронта, которые собирающими линзами фокусировались в плоскость регистрации, где определялись смещения изображений. Основные параметры прибора: размеры линз – D, расстояние между их центрами – d, фокусное расстояние линз – l. В результате обработки полученных данных вычислялась дисперсия разности смещений σ_l^2, позволяющая вычислить радиус Фрида пучка следующим образом (6) [6]:

$$r_0=\left[\frac{\sigma_l^2}{2\lambda^2\left(0{,}157D^{-1/3}-0{,}097d^{-1/3}\right)}\right]^{-3/5}, \quad (6)$$

и структурную постоянную турбулентности:

$$C_n^2=\frac{\sigma_l^2}{1{,}411\pi^2L\left(0{,}157D^{-1/3}-0{,}097d^{-1/3}\right)}. \quad (7)$$

В приведенных формулах λ – длина волны излучения, L – расстояние от источника до входной апертуры прибора, остальные параметры были введены выше.

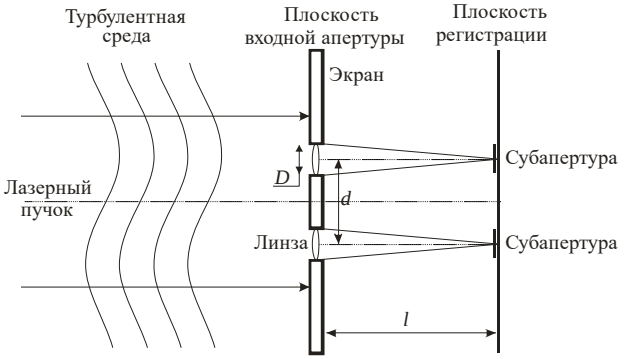


Рис. 2. *Оптическая схема дифференциального измерителя интенсивности турбулентности*

Fig. 2. *Optical diagram of the differential turbulence intensity meter*

Авторы [7] предлагают также одноканальную модификацию оптической схемы. В этом случае в плоскости входной апертуры находится только одно отверстие, в котором располагается фокусирующая линза. Формула (2) при этом изменяется и принимает вид:

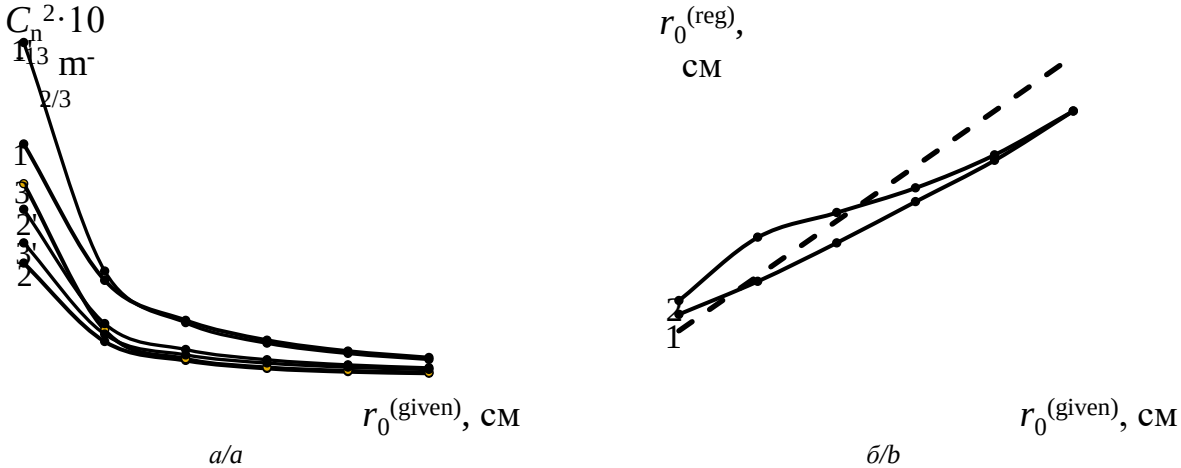
$$C_n^2 = \frac{\sigma_x^2}{1{,}094 L D^{-1/3}}. \qquad (8)$$

Здесь σ_x^2 – дисперсия смещения центра сфокусированного пучка вдоль одной из осей координатной системы.

Численный эксперимент позволил не только в широком диапазоне варьировать параметры задачи, но и получать данные, недоступные в натурных исследованиях. В частности, в плоскости апертуры прибора вычислялись такие интегральные характеристики излучения, как: критерий фокусировки, пропорциональный мощности, попадающей в пределы апертуры заданных размеров; смещение центра пучка, его радиус [18] и некоторые другие параметры. Кроме этого, возможным являлось проведение различных проверок точности компьютерного приложения. Так, приведенные выше формулы демонстрируют, что структурная постоянная может быть вычислена не только в результате регистрации смещения пучка по формулам (7) или (8), но и определена из уравнения (5) при известном радиусе Фрида, который в построенном программном приложении является входным параметром. Эта особенность в дальнейшем была использована для оценки точности используемой модели.

Результаты численных экспериментов

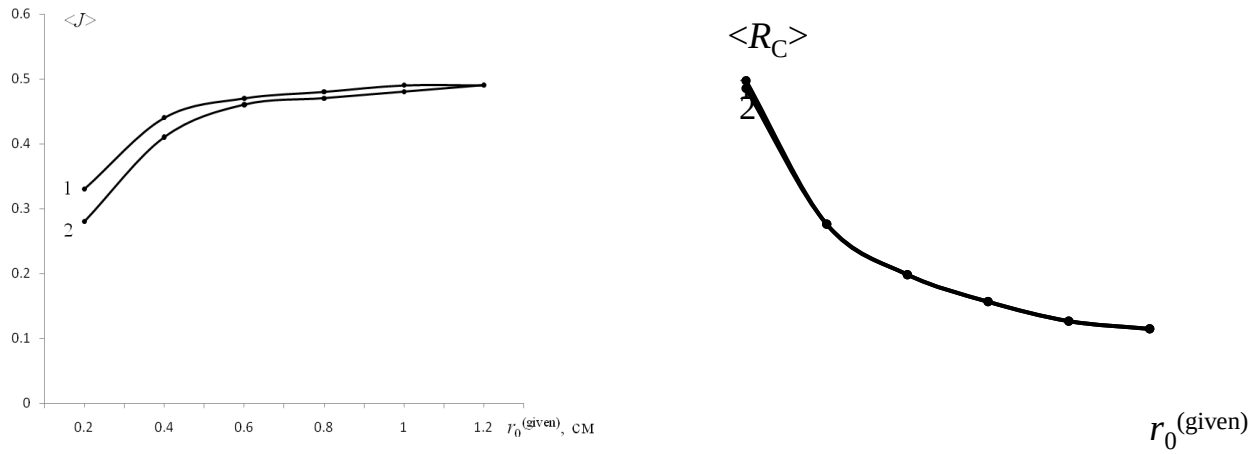
Данные, полученные при моделировании двухканальной системы и вычисленные согласно (5), приводятся на рис. 3, *а*, где C_n представлена как функция заданного радиуса Фрида $r_0^{(given)}$, являющегося входным параметром модели. На рис. 3, *б* аналогичная зависимость показана для $r_0^{(reg)}$ (регистрируемый параметр), определенного в двухканальной и одноканальной схемах.



а/a *б/b*

Рис. 3. *Иллюстрация точности вычислений при регистрации структурной постоянной (а) и радиуса Фрида (б). а) кривые, отмеченные номерами со штрихами, получены по формуле (5), кривые с номерами без штрихов являются результатом численного эксперимента. Длины трасс: 100 м (кривые 1 и 1'), 200 м (2 и 2') и 250 м (3 и 3'); б) кривая 1 получена для модели с одной апертурой, 2 – с двумя апертурами. Штриховая кривая показывает прямо пропорциональную зависимость. Длина трассы 200 м. Внутренний масштаб при получении обоих графиков l_0=0,19 мм*

Fig. 3. *Illustration of the calculation accuracy when registering the structural constant (a) and the Fried's coherence length (b). a) the curves marked with primed numbers were obtained with Eq. (5), while the unprimed numbers are the result of a numerical calculations. The path lengths are 100 m (curves 1 and 1'), 200 m (2 and 2'), and 250 m (3 and 3');* b) *curve 1 was obtained for a model with one aperture, and 2 – with two apertures. The dashed curve shows a directly proportional relationship. The path length is 200 m. The inner scale was* l_0*=0.19 mm*



а/a *б/b*

Рис. 4. *Зависимость от интенсивности турбулентности средних значений критерия фокусировки <J> и смещения энергетического центра пучка <Rc>. Внутренний масштаб l_0=0,19 мм (кривая 1) и l_0=9,52 мм (кривая 2)*

Fig. 4. *Dependence of the average values of the focusing criterion <J> and the shift of the beam energy center <Rc> on the turbulence intensity. The inner scale was l_0=0.19 mm (curve 1) and l_0=9.52 mm (curve 2)*

Рис. 3 показывает, что даже в численном эксперименте невозможно добиться абсолютной точности регистрации характеристик турбулентности. Тем не менее все тенденции, задаваемые изменением условий задачи, на представленных графиках прослеживаются достаточно хорошо.

Рассмотрим, как при варьировании параметров изменяются характеристики излучения. Средние значения критерия фокусировки и смещения центра тяжести пучка, вычисленные согласно [18] и представленные как функции интенсивности искажений, приводятся на рис. 4. Кривые получены для различных внутренних масштабов турбулентности.

В целом полученные функции имеют ожидаемое поведение – при увеличении радиуса Фрида средние значения критерия фокусировки увеличивается, а радиус пучка уменьшается, т. е. влияние искажающего воздействия среды снижается. Графики также показывают, что на интегральные характеристики практически не оказывает влияние внутренний масштаб; вариации смещения $<R_c>$ совпадает полностью (рис. 4, *б*), а кривые, характеризующие критерий, проходят очень близко друг к другу (рис. 4, *а*). В то же время амплитудные распределения интенсивности излучения для различных внутренних масштабов различаются значительно, особенно при высокой интенсивности турбулентности (рис. 5).

В целом можно заключить, что структурная постоянная, регистрируемая исследуемой оптической системой, так же, как и интегральные параметры пучка, не характеризует полностью условия распространения излучения. Поэтому для более полного представления о турбулентных искажениях необходимым является получение дополнительных данных. В частности, о неоднородностях волнового фронта могут нести информацию оптические вихри – особые точки, возникающие при распространении пучка в случайно-неоднородной среде [19, 20]. Для регистрации вихрей будем использовать алгоритм вычисления циркуляции градиентов волнового фронта [20].

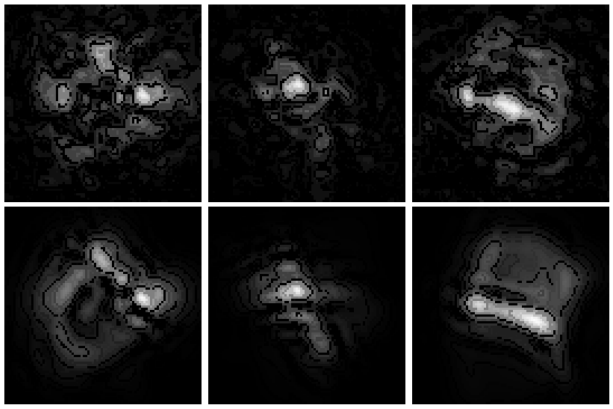
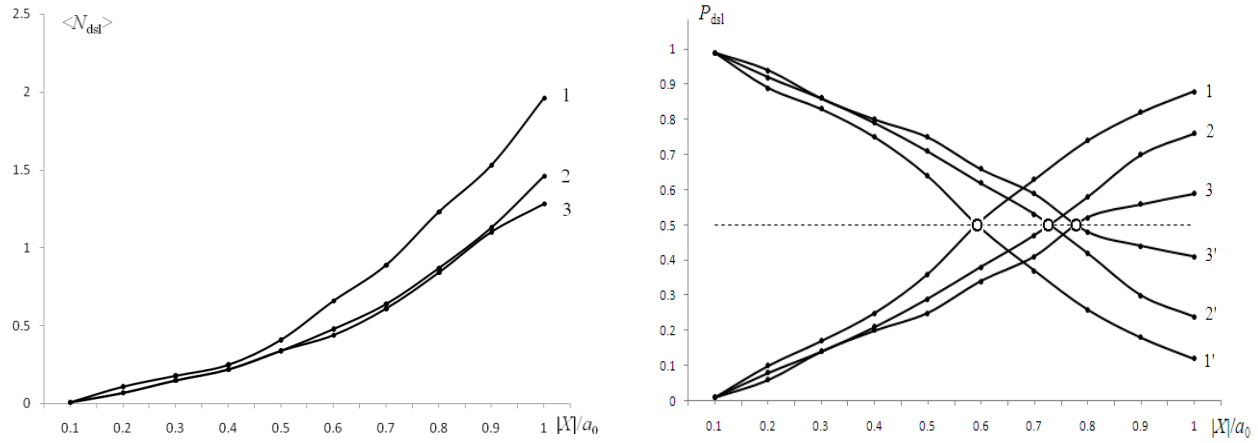


Рис. 5. *Амплитудные распределение лазерного пучка, зафиксированные в различные моменты времени. Верхний ряд рисунков: l_0=0,19 мм, нижний – l_0=9,52 мм*

Fig. 5. *Amplitude distribution of the laser beam, recorded at different moments in time. Upper row of figures: l_0=0.19 mm, lower – l_0=9.52 mm*

Анализ рис. 6, 7 показывает, что число дислокаций зависит от интенсивности искажений, определяемой структурной постоянной C_n или, при фиксированной длине волны и длине трассы, радиусом Фрида r_0.



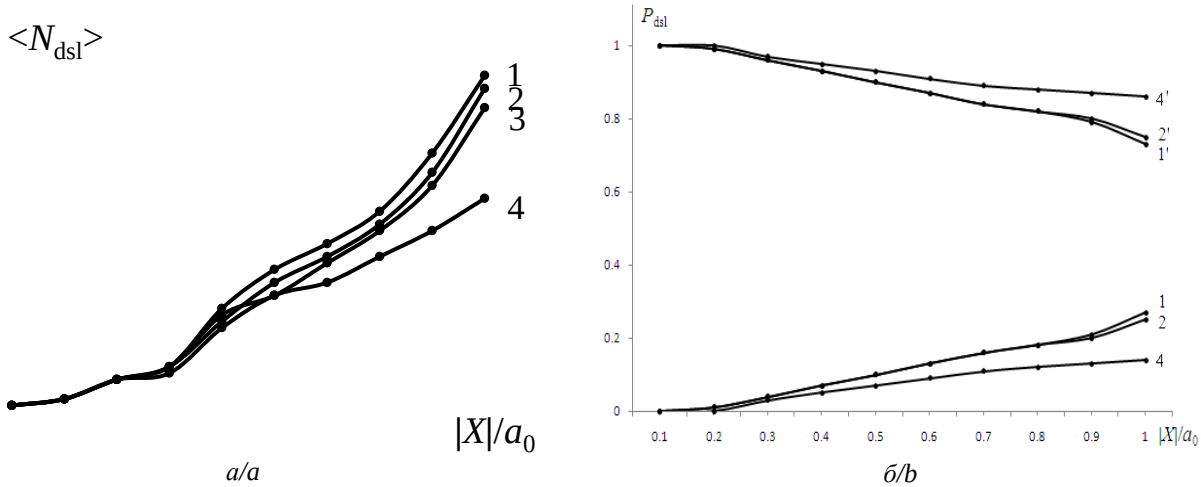
а/a *б/b*

Рис. 6. *Число особых точек в пучке (а) и вероятность их появления (б, кривые 1, 2, 3) или отсутствия (б, кривые 1', 2', 3'). Параметры численного эксперимента: r_0=0,2 см, l_0=0,2 (кривые 1 и 1'); 3,0 (2 и 2'); 10,0 (3 и 3') мм. a_0 – начальный радиус пучка, X – координата, откладываемая от его центра*

Fig. 6. *Number of singular points in the beam (a) and the probability of their presence (b, curves 1, 2, 3) or absence (b, curves 1', 2', 3'). Parameters of the numerical experiment: r_0=0.2 cm, l_0=0.2 (curves 1 and 1'); 3.0 (2 and 2'); 10.0 (3 and 3') mm. a_0 is the initial radius of the beam, X is the coordinate measured from its center*

Также наблюдается зависимость от внутреннего масштаба турбулентности l_0. Рис. 6, *а*, 7, *а* демонстрируют, что в центральной области пучка, радиус которой меньше чем 0,2 начального радиуса пучка a_0, вихри практически отсутствуют, но их число быстро увеличивается на краях. Скорость увеличения тем больше, чем меньше внутренний масштаб.

Кроме числа особых точек в численных экспериментах определялись их статистические характеристики, в частности вероятность [21] возникновения в различных областях пучка (рис. 6, *б*, 7, *б*). Кривые 1, 2 и 3 показывают вероятность появления реализаций с вихрями в круге определенного радиуса, кривые 1', 2' и 3' – вероятность их отсутствия. Точки пересечения кривых определяют границу области, в которой наличие и отсутствие дислокаций равновероятны. Можем видеть, что вероятность появления вихрей в центре пучка стремится к нулю и возрастает с увеличением расстояния от центра. При уменьшении внутреннего масштаба точка пересечения кривых сдвигается к центральной области (рис. 6, *б*) при r_0=0,2 см. При меньших искажениях (r_0=0,4 см, рис. 7, *б*) пересечения кривых не наблюдается, т. е. на всей площади, занимаемой пучком, вероятность отсутствия вихрей больше, чем вероятность их наличия.



а/a *б/b*

Рис. 7. *То же, что на рис. 6. Параметры численного эксперимента: r_0=0,4 см, l_0=0,2 (кривые 1 и 1'); 3,0 (2 и 2'); 5,0 (3 и 3'); 10,0 (4 и 4') мм*

Fig. 7. *Same as in the Fig. 6. Parameters of the numerical experiment: r_0=0.4 cm, l_0=0.2 (curves 1 and 1'); 3.0 (2 and 2'); 5.0 (3 and 3'); 10.0 (4 and 4') mm*

Приведенные данные позволяют заключить, что увеличение внутреннего масштаба и/или радиуса Фрида делают пучок более гладким, его искажения уменьшаются.

Эргодичность модели турбулентности

В таких разделах знаний, как обработка сигналов, статистика и оптика атмосферы, вводят определение эргодичности случайного процесса следующим образом: процесс находится в эргодическом режиме (является эргодическим), если среднее значение по ансамблю реализаций для наблюдаемого объекта равно среднему по времени [22]. В этом случае любая реализация должна представлять средние статистические свойства всего режима.

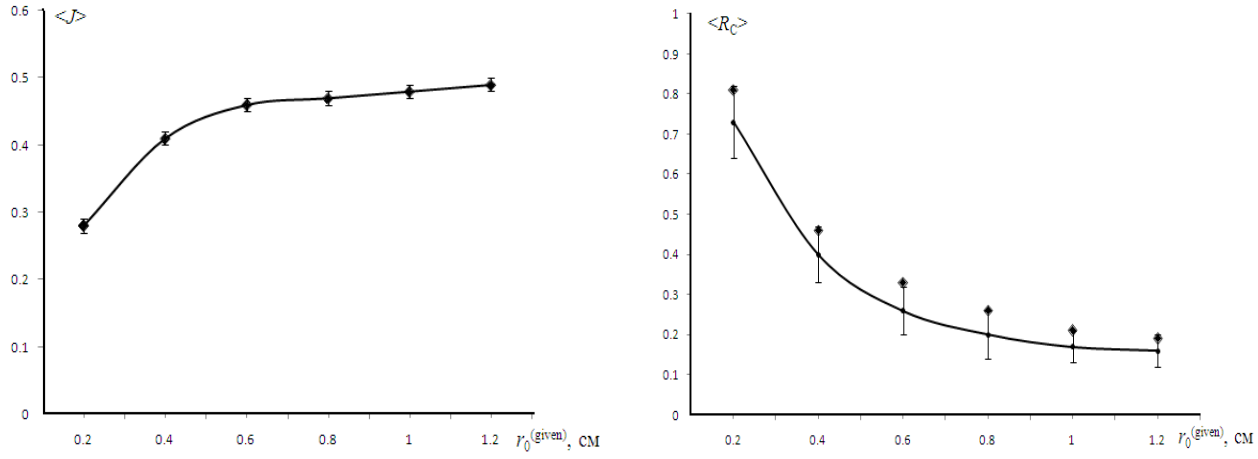
Так как эргодичность является важным свойством случайного процесса, интерес представляет исследование эргодичности описанной в настоящей работе модели распространения пучка в турбулентной среде. Для характеристики излучения целесообразно использовать параметры пучка, введенные в разделе выше настоящей статьи, и статистические свойства оптических вихрей – их число и вероятность появления в волновом фронте. Определение средних значений по времени будем проводить для функций, полученных при движении фазового экрана, определение средних по ансамблю – в тех же самых условиях. Для этого в алгоритме численного решения волнового уравнения из случайного фазового экрана размерности 2048×2048 снова вырежем квадрат 512×512, но сейчас уже не сдвигаем его, а последовательно меняем «большой» случайный экран. При таком решении задачи генерация экранов требует много времени, но распространение пучка при усреднении по времени и по ансамблю проходит в одинаковых условиях.

Критерий фокусировки и смещения энергетического центра, вычисленные двумя методами, приводятся на рис. 8. Можем видеть, что полученные значения являются достаточно близкими, средние по времени (ромбы) попадают в доверительный интервал значений, регистрируемых при усреднении по ансамблю (точки, соединенные сплошной линией).

Дополнительная информация об искажениях излучения может быть получена при анализе распределения особых точек волнового фронта пучка. В качестве примера на рис. 9, *а* приводится среднее число оптических вихрей, вероятность их обнаружения – на рис. 9, *б*.

Рисунки показывают, что усреднение по времени обеспечивает несколько большее количество вихрей (рис. 9, *а*), также возрастает вероятность их обнаружения (рис. 9, *б*).

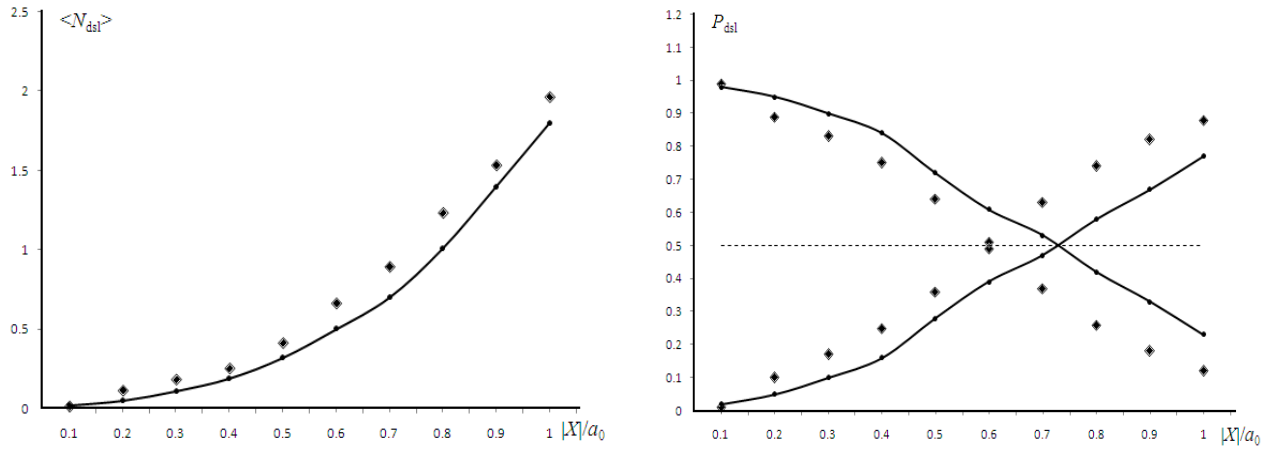
В целом заключаем, что в обоих рассмотренных случаях полученные результаты являются достаточно близкими.



а/a *б/b*

Рис. 8. *Иллюстрация эргодичности процесса распространения излучения в случайно-неоднородной среде. Сплошная линия показывает усредненные по ансамблю реализаций значения параметра, ромбы – результат усреднения по времени. Регистрируемые параметры излучения: критерий фокусировки (а) и смещение энергетического центра пучка (б). Варьируемый параметр модели – радиуса Фрида. Внутренний масштаб турбулентности l_0=0,2 мм, нормированная длина трассы Z=0,2*

Fig. 8. *Illustration of the ergodicity of the radiation propagation in a randomly inhomogeneous medium. The solid line shows the mean values of parameter averaged over the ensemble of realizations, the diamonds are the result of averaging over time. The recorded radiation parameters are the focusing criterion (a) and the shift of the beam energy center (b). The variable characteristic of the model is the Fried's coherence length. The inner scale of turbulence is l_0=0.2 mm, the normalized path length is Z=0.2*



а/a *б/b*

Рис. 9. *Среднее число особых точек в пучке (а) и вероятность (б) их наличия (кривая 1) или отсутствия (кривая 2). Параметры численного эксперимента и введенные обозначения не изменялись*

Fig. 9. *Average number of singular points in a beam (a) and probability (b) of their presence (curve 1) or absence (curve 2). The parameters of the numerical experiment and the introduced notations were not changed*

Заключение

Представленные в статье данные позволяют заключить, что построенная численная модель дифференциального измерителя интенсивности турбулентности обладает удовлетворительной точностью, причем двухканальная и одноканальная схемы регистрации параметров обеспечивают приблизительно одинаковые результаты. В то же время структурная постоянная турбулентности и радиус Фрида не характеризуют полностью условия распространения излучения. Для более полного описания искажений необходимо привлечение интегральных и локальных характеристик излучения и проведение анализа распределения вихрей в волновом фронте излучения. Проведенные исследования также показали, что распространение излучения в турбулентной атмосфере является эргодическим случайным процессом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Регистрация орбитального углового момента лазерного пучка через его разложение по оптическим вихрям и его использование в системе связи в турбулентной атмосфере / В.П. Аксенов, В.В. Дудоров, В.В. Колосов, Ч.Е. Погуца, Е.С. Абрамова // Оптика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 33. – № 5. – С. 347–357. DOI: 10.15372/AOO20200504 EDN: AEEMKU
2. Overview of the lunar laser communications demonstration / B.S. Robinson, D.M. Boroson, D.A. Burianek, D.V. Murphy // Proc. SPIE 7923, Free-Space Laser Communication Technologies XXIII. – 2011. – Vol. 7923. – article number 792302. DOI: https://doi.org/10.1117/12.878313 EDN: OMPADF
3. Измерения параметров атмосферы на протяженной трассе. II. Оптические измерения уровня турбулентности / А.Г. Борзилов, П.А. Коняев, В.П. Лукин, Е.Л. Соин // Оптика атмосферы и океана. – 2023. – Т. 36. – № 7. – С. 557–562. DOI: 10.15372/AOO20230704 EDN: KLKFMJ
4. Sarazin M., Roddier F. The ESO differential image motion monitor // Astronomy and Astrophysics. – 1990. – Vol. 227. – № 1. – P. 294–300.
5. Image jitter meter for low intensity radiation / A.G. Borzilov, A.N. Gritsuta, P.A. Konyaev, V.P. Lukin, V.V. Nosov, E.L. Soin, A.V. Torgaev // Proc. SPIE 12341, 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2022. – Vol. 12341. – article number 123410F1. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2644417
6. Сравнительные измерения параметров атмосферной турбулентности оптическими методами / П.А. Коняев, В.П. Лукин, В.В. Носов, Е.В. Носов, Е.Л. Соин, А.В. Торгаев // Оптика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 34. – № 11. – С. 906–915. DOI: 10.15372/AOO20211111 EDN: BYFQVK
7. Дифференциальный измеритель параметров оптической турбулентности / Л.В. Антошкин, Н.Н. Ботыгина, О.Н. Емалеев, Л.Н. Лавринова, В.П. Лукин // Оптика атмосферы и океана. – 1998. – Т. 11. – № 11. – С. 1219–1223. EDN: FVNFXO
8. Tyson R.K., Frazier B.W. Principles of adaptive optics. – Boca Raton: CRC Press, 2022. – 356 p. DOI: https://doi.org/10.1201/9781003140191
9. Лукин В.П., Фортес Б.В. Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 214 с. EDN: YQCACT
10. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. – М.: Наука, 1985. – 335 с.
11. Martin J., Flatte S.M. Intensity images and statistics from numerical simulation of wave propagation in 3-D random Media // Applied Optics. – 1988. – № 11. – P. 2111–2126. DOI: 10.1364/AO.27.002111 EDN: YEOMBE

12. Konyaev P., Kanev F. Comparison of analytical and numerical estimations of laser beam spreading in turbulent atmosphere // Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2019. – Vol. 11208. – article number 112081J. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2540299 EDN: WWGGJL
13. Numerical simulation of an adaptive optics system with laser propagation in the atmosphere / Hai-Xing Yan, Shu-Shan Li, De-Liang Zhang, She Chen // Applied Optics. – 2000. – Vol. 39. – Iss. 18. – P. 3023–3031. DOI: https://doi.org/10.1364/AO.39.003023
14. Britton M.C. Numerical simulations of single conjugate adaptive optics systems // Proc. SPIE 5490, Advancements in Adaptive Optics. – 2004. – Vol. 5490. DOI: https://doi.org/10.1117/12.552325
15. Jasim S.U., Hassan R.N. Investigation of numerical simulation for adaptive optics system // Iraqi Journal of Physics. – 2023. – Vol. 21. – № 3. – P. 9–23. DOI: https://doi.org/10.30723/ijp.v21i3.1122 EDN: EJDDWP
16. Marchuk G.I. Methods of numerical mathematics. Second Edition. – New York: Springer-Verlag, 1982. – 510 p.
17. Кандидов В.П., Чесноков С.С., Шленов С.А. Дискретное преобразование Фурье. – М.: Изд-во физического факультета МГУ, 2019. – 88 с.
18. Канев Ф.Ю., Лукин В.П. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы, 2005. – 249 с. EDN: QJPUZT
19. Kanev F.Yu., Makenova N.A, Veretekhin I.D. Development of singular points in a beam passed phase screen simulating atmospheric turbulence and precision of such a screen approximation by Zernike polynomials // Photonics. – 2022. – Vol. 9. – Iss. 5. – article number 285. DOI: https://doi:10.3390/photonics9050285 EDN: JTJDVH
20. Канев Ф.Ю., Аксенов В.П., Веретехин И.Д. Анализ точности алгоритмов регистрации оптических вихрей // Оптика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 34. – № 1. – С. 5–16. DOI: 10.15372/AOO20210101 EDN: AWJJVG
21. Справочник по теории вероятности и математической статистике / В.С. Королюк, Н.И. Портенко, А.В. Скороход, А.Ф. Турбин. – М.: Наука, 1985. – 640 с.
22. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Статистическая радиофизика и оптика. Случайные колебания и волны в линейных системах. – М.: Физматлит, 2010. – 428 с.

Информация об авторах

Наиля Алтынхановна Макенова, научный сотрудник лаборатории когерентной и адаптивной оптики Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1; доцент Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. makenova@tpu.ru

Юлия Геннадьевна Грекова, студент Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. grekova.yuliya11@mail.ru

Федор Юрьевич Канев, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории когерентной и адаптивной оптики Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. mna@iao.ru

Поступила: 12.03.2025
Принята после рецензирования: 12.06.2025
Опубликована: 30.06.2025

REFERENCES

1. Aksenov V.P., Dudorov V.V., Kolosov V.V., Pogutsa C.E., Abramova E.S. Detection of the orbital angular momentum of a laser beam by means of its decomposition into optical vortices and its use in a communication system in the turbulent atmosphere. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2020, vol. 33, no. 5, pp. 347–357. (In Russ.) DOI: 10.15372/AOO20200504 EDN: AEEMKU
2. Robinson B.S., Boroson D.M., Burianek D.A., Murphy D.V. Overview of the lunar laser communications demonstration. *Proc. SPIE 7923, Free-Space Laser Communication Technologies XXIII*, 2011, vol. 7923, article number 792302. DOI: https://doi.org/10.1117/12.878313 EDN: OMPADF
3. Borzilov A.G., Konyaev P.A., Lukin V.P., Soin E.L. Measurements of atmospheric parameters along an extended path. II. Optical measurements of turbulence. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2023, vol. 36, no. 7, pp. 557–562. (In Russ.) DOI: 10.15372/AOO20230704 EDN: KLKFMJ
4. Sarazin M., Roddier F. The ESO differential image motion monitor. *Astronomy and Astrophysics*, 1990, vol. 227, no. 1, pp. 294–300.
5. Borzilov A.G., Gritsuta A.N., Konyaev P.A., Lukin V.P., Nosov V.V., Soin E.L., Torgaev A.V. Image jitter meter for low intensity radiation. *Proc. SPIE 12341, 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2022, vol. 12341, article number 123410F1. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2644417
6. Konyaev P.A., Lukin V.P., Nosov V.V., Nosov E.V., Soin E.L., Torgaev A.V. Comparative measurements of atmospheric turbulence parameters by optical methods. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2021, vol. 34, no. 11, pp. 906–915. (In Russ.) DOI: 10.15372/AOO20211111 EDN: BYFQVK
7. Antoshkin L.V., Botygina N.N., Emaleev O.N., Lavrinova L.N., Lukin V.P. Differential meter of optical turbulence parameters. *Atmospheric and Ocean Optics*, 1998, vol. 11, no. 11, pp. 1219–1223. (In Russ.) EDN: FVNFXO
8. Tyson R.K., Frazier B.W. *Principles of adaptive optics*. Boca Raton, CRC Press, 2022. 356 p. DOI: https://doi.org/10.1201/9781003140191
9. Lukin V.P., Fortes B.V. *Adaptive formation of beams and images in the atmosphere*. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ. House, 1999. 214 p. (In Russ.) EDN: YQCACT
10. Vorontsov M.A., Shmalgauzen V.I. *Principles of adaptive optics*. Moscow, Nauka Publ., 1985. 335 p. (In Russ.)

11. Martin J., Flatte S.M. Intensity images and statistics from numerical simulation of wave propagation in 3-D random Media. *Applied Optics*, 1988, no. 11, pp. 2111–2126. DOI: 10.1364/AO.27.002111 EDN: YEOMBE
12. Konyaev P., Kanev F. Comparison of analytical and numerical estimations of laser beam spreading in turbulent atmosphere. *Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2019, vol. 11208, article number 112081J. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2540299 EDN: WWGGJL
13. Hai-Xing Yan, Shu-Shan Li, De-Liang Zhang, She Chen. Numerical simulation of an adaptive optics system with laser propagation in the atmosphere. *Applied Optics*, 2000, vol. 39, Iss. 18, pp. 3023–3031. DOI: https://doi.org/10.1364/AO.39.003023
14. Britton M.C. Numerical simulations of single conjugate adaptive optics systems. *Proc. SPIE 5490, Advancements in Adaptive Optics*, 2004, vol. 5490. DOI: https://doi.org/10.1117/12.552325
15. Jasim S.U., Hassan R.N. Investigation of numerical simulation for adaptive optics system. *Iraqi Journal of Physics*, 2023, vol. 21, no. 3, pp. 9–23. DOI: https://doi.org/10.30723/ijp.v21i3.1122 EDN: EJDDWP
16. Marchuk G.I. *Methods of numerical mathematics. Second Edition*. New York, Springer-Verlag, 1982. 510 p.
17. Kandidov V.P., Chesnokov S.S., Shlenov S.A. *Discrete Fourier transform*. Moscow, Physics Faculty of Moscow State University Publ. house, 2019. 88 p. (In Russ.)
18. Kanev F.Yu., Lukin V.P. *Adaptive optics. Numerical and experimental studies*. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics Publ. house, 2005. 249 p. (In Russ.) EDN: QJPUZT
19. Kanev F.Yu., Makenova N.A., Veretekhin I.D. Development of singular points in a beam passed phase screen simulating atmospheric turbulence and precision of such a screen approximation by Zernike polynomials. *Photonics*, 2022, vol. 9, Iss. 5, article number 285. DOI: https://doi:10.3390/photonics9050285 EDN: JTJDVH
20. Kanev F.Yu., Aksenov V.P., Veretekhin I.D. Precision of algorithms for detecting optical vortices. *Atmospheric and Ocean Optics*, 2021, vol. 34, no. 1, pp. 5–16. (In Russ.) DOI: 10.15372/AOO20210101 EDN: AWJJVG
21. Korolyuk V.S., Portenko N.I., Skorokhod A.V., Turbin A.F. *Handbook of Probability Theory and Mathematical Statistics*. Moscow, Nauka Publ., 1985. 640 p. (In Russ.)
22. Akhmanov S.A., Dyakov Yu.E., Chirkin A.S. *Statistical radiophysics and optics. Random oscillations and waves in linear systems*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 428 p. (In Russ.)

Information about the authors

Nailya A. Makenova, Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634055, Russian Federation; Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. makenova@tpu.ru

Yulia G. Grekova, Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. grekova.yuliya11@mail.ru

Feodor Yu. Kanev, Dr. Sc., Leading Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634055, Russian Federation. mna@iao.ru

Received: 12.03.2025
Revised: 12.06.2025
Accepted: 30.06.2025